

드릴십의 대형 크레인 페데스털의 피로해석에 관한 연구

이정훈¹·이주성^{2,†}
현대중공업 조선구조설계부¹
울산대학교 조선해양공학부^{2,†}

On the Fatigue Analysis of Large Crane Pedestal in Drillship

Jeong-Hoon Lee¹·Joo-Sung Lee^{2,†}
Basic Hull Design Department, Hyundai Heavy Industries¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan^{2,†}

Abstract

Drillship has several large cranes to handle the various equipments for drilling work. These cranes are supported by crane pedestals which are installed on main deck. Two major loads, i.e., hull girder bending moment and crane operation loading shall be considered to confirm the structural strength in way of crane pedestal. In this paper, the fatigue analysis is performed for the structures in way of crane pedestal considering two(2) loads as mentioned in the above is introduced.

Keywords : Crane(크레인), Crane pedestal(크레인 페데스털), Fatigue analysis(피로 해석)

1. 서론

드릴십에는 시추작업 시 각종 장비들의 취급을 위하여 대형 크레인이 설치되며, 이를 지탱하는 크레인 페데스털이 상 갑판에 설치된다. 이 크레인 페데스털은 선체굽힘모멘트에 의한 하중 및 크레인 작동에 의한 하중을 받게 된다. 이러한 하중에 대한 구조적 안전성을 검토하기 위하여 유한요소해석 및 피로해석이 수행된다. Kim, et al. (2008)의 연구에서는 구조해석을 통한 핫스팟 응력을 이용한 피로해석으로 컨테이너선의 중늑골에 대한 피로해석을 수행하였다. 그러나 이들 해석법은 크레인 운용 시 발생하는 동하중에 의한 피로강도를 반영하지 못한다. 따라서 각종 중량물에 의한 동하중이 걸리는 드릴십의 크레인 페데스털의 피로해석을 하기 위한 방법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는, 기 조선소에서 2010년에 실제 건조된 드릴십에 설치된 165ton 크레인 페데스털을 대상으로, 수직파랑 굽힘모멘트 하중에 대한 부분은 DNV(Det Norske Veritas) CN(Classification Notes) 30.7(2010)에 정의된 간략화된 피로해석 방법(simplified fatigue method)에 따라서, 크레인 운용 시 발생하는 동하중에 대한 부분은 F.E.M(Federation Europeenne De La Manutention) 1.001(1998)에 따라서 피로강도를 검토하였다.

2. 크레인 페데스털 피로해석 절차

DNV-RP(Recommended Practices)-C102 (2002)에 의하면, 크레인 페데스털의 누적손상도 D 는 식 (1)과 같이 수직파랑 굽힘모멘트로 인한 누적손상도 D_{VWBM} 과 크레인 작동에 의하여 발생하는 동하중으로 인한 누적손상도 D_{crane} 의 합으로 다음과 같이 가정한다.

- 크레인 작업은 대체적으로 해상환경이 안정된 상태(calm sea)에서 행하여지므로, D_{VWBM} 과 D_{crane} 은 상호독립적(mutually exclusive)이다.
- 크레인 전체 사용횟수는 설계 피로년수 동안 운용된 횟수이다.

$$D = D_{VWBM} + D_{crane} \quad (1)$$

DNV CN 30.7(2010)에 의하면 두 개의 기울기를 가지는 SN 선도(two slope SN curve)를 적용할 때, 수직파랑 굽힘모멘트와 같은 변동하중의 장기분포는 Weibull 분포가 되며, 이때 구하여진 누적손상도는 식 (2)와 같다.

$$D_{VWBM} = \nu_o T_d \sum_{n=1}^N p_n \left[\frac{q_n^{m_1}}{a_1} \Gamma \left(1 + \frac{m_1}{h}; \left(\frac{S_1}{q_n} \right)^h \right) + \frac{q_n^{m_2}}{a_2} \gamma \left(1 + \frac{m_2}{h}; \left(\frac{S_1}{q_n} \right)^h \right) \right] \quad (2)$$

여기에서

- T_d : Design life of ship in second
- p_n : Fraction of load conditions in load condition n
- h : Weibull shape parameter
- q_n : Weibull stress scale distribution parameter
- ν_o : Long term average response zero-crossing frequency
- a_1, a_2, m_1, m_2 : SN parameters for air
- S_1 : Stress range for which change of slope of SN curve occur
- $\Gamma(\cdot)$: Incomplete Gamma function
- $\gamma(\cdot)$: Complementary Incomplete Gamma function

Gusto Projects B.V. "Hull Crane Foundation Calculation Report" (2008)에 의하면, 본 크레인에는 아래 Table 1과 2에 나타난 F.E.M 1,001(1998)의 자료 중에 Classification B4/P1을 가진다.

Table 1은 크레인의 사용횟수를 나타내는 클래스로서 B4는 최대 250,000회 사용하는 것을 의미한다. Table 2는 스펙트럼 계수를 나타내는 클래스로서 P1은 스펙트럼 계수(K_{sp}) 최대 0.125를 의미한다.

스펙트럼 계수란, 최대하중을 고려해서 나오는 구조해석 상의 최대응력을 피로해석용 응력으로 변환시키는 계수이며, 식 (3)과 (4)와 같이 정의된다.

$$K_{sp} = \int_0^1 y^3 dx \quad (3)$$

식 (3)에서 y 는 분포함수, 즉 $y = f(x)$ 로 정의되며 x 와 y 는 식 (4)와 같다.

$$x = \frac{n}{n_{max}}, y = \frac{\sigma}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

여기에서

- σ : Stress
- σ_{max} : Maximum stress
- n : Number of hoisting cycles in respect of which the hoisted load is greater than or equal to σ
- n_{max} : Number of hoisting cycles determining the total duration of use

Fig. 1은 $y = f(x)$ 에 의한 분포함수의 예를 보여준다.

Table 1 Class of utilization

Class	Total duration of use (number n of stress cycle)
B0	$n \leq 16,000$
B1	$16,000 < n \leq 32,000$
B2	$32,000 < n \leq 63,000$
B3	$63,000 < n \leq 125,000$
B4	$125,000 < n \leq 250,000$
B5	$250,000 < n \leq 500,000$
B6	$500,000 < n \leq 1,000,000$
B7	$1,000,000 < n \leq 2,000,000$
B8	$2,000,000 < n \leq 4,000,000$
B9	$4,000,000 < n \leq 8,000,000$
B10	$8,000,000 < n$

Table 2 Spectrum classes

Class	Spectrum factor, K_{sp}
P1	$K_{sp} \leq 0.125$
P2	$0.125 < K_{sp} \leq 0.250$
P3	$0.250 < K_{sp} \leq 0.500$
P4	$0.500 < K_{sp} \leq 1$

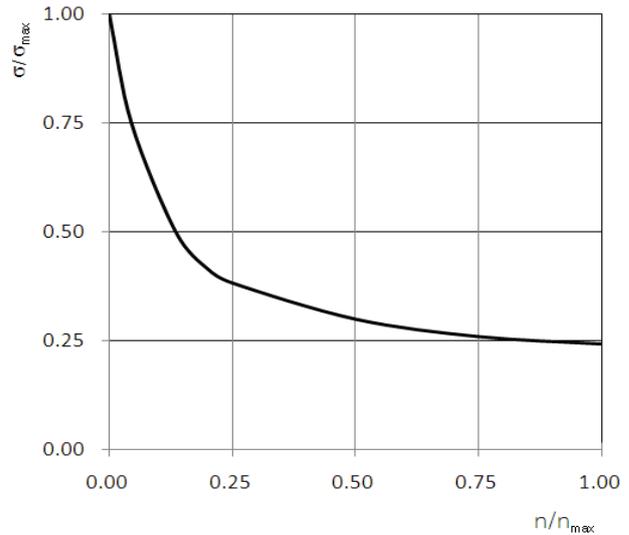


Fig. 1 Distribution function

즉 전체 사용횟수 동안의 응력분포를 그래프로 나타낸 것으로서, 이를 식 (3)과 같이 적분을 하여 스펙트럼 계수를 구하게 된다.

이와 같이 정의된 크레인의 사용횟수, 스펙트럼 계수 그리고 핫스팟 응력을 이용한 누적 손상도는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$D_{crane} = \frac{n}{N} \quad (5)$$

식 (5)에서 n 은 본 크레인의 사용횟수, 즉 250,000회이며, N 은 식 (6)과 같다.

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \Delta \sigma \quad (6)$$

25mm 두께 이상 되는 판재의 경우, 두께방향 피로 균열진전을 고려하기 위하여 식 (7)과 같이 두께 효과를 반영한 식을 사용한다.

$$\log N = \log \bar{a} - \frac{m}{4} \log \left(\frac{t}{25} \right) - m \log \Delta \sigma \quad (7)$$

크레인 운용에 의한 응력범위는 식 (8)에 의하여 구하여진다.

$$\Delta \sigma = K_{sp}^{1/3} (\Delta \sigma_{model}) \quad (8)$$

식 (6), (7)과 (8)에 사용된 기호의 의미는 다음과 같다.

- N : Predicted number of cycles to failure
- $\Delta \sigma$: Stress range
- m : Negative inverse slope of S-N curve
- $\log \bar{a}$: Intercept of log N-axis by S-N curve
- t : Thickness
- $\Delta \sigma_{model}$: Stress range from model

3. 실선 적용 예

3.1 해석 절차

본 연구에서 사용한 피로강도 해석 절차는 Fig. 2와 같다.

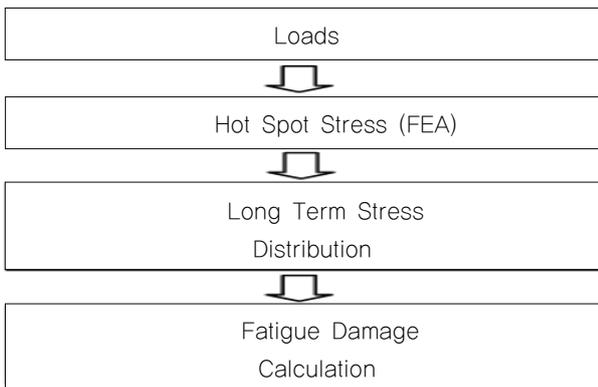


Fig. 2 Procedure of the present fatigue strength analysis

3.2 유한요소해석

드릴십에 설치된 165 ton 크레인 페데스탈의 주요 응력 집중부위의 핫스팟 응력을 구하기 위하여, Fig. 3과 같은 구조해석 모델에 Table 3의 하중조건(이하 LC), Fig. 4의 경계조건을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 이때 Plane ABB' A', EFF' E' 는 불연속 구조이기 때문에 종하중을 받지 않으므로 강제변위 대신 x 방향을 구속하였다.

Table 3의 하중조건에 대하여 간략히 설명을 하면 LC 1, 2의 VWBM (Vertical Wave Bending Moment)는 선급규칙에 의한 수직파랑 굽힘모멘트를 10^{-8} 확률에서 10^{-4} 확률로 전환한 값이다. LC 3, 4는 크레인 페데스탈의 끝단을 기준으로 계산된 크레인 운용중 동하중이며, 운용상태는 Table 4에서 보여준다. LC 5, 6은 수직파랑 굽힘모멘트로 인한 누적손상도 계산 시 필요한 f_m 계수 (Mean stress reduction factor)를 계산하기 위한 하중조건으로서, 하중조건 5은 운항중 정수중 굽힘모멘트이며, 하중조건 6은 드릴링 작업시의 정수중 굽힘모멘트이다.

피로해석부위는 별도의 응력해석을 통하여 응력이 집중되는 부위를 선정하였으며, 각각의 피로해석 부위의 요소 크기는 핫스팟 응력을 구하기 위하여, 각 부위의 두께로 하였다. 한편, 요소 형상은 4각형 4절점 판 요소를 사용하였고, 크레인 회전을 고려하여 LC 3, 4는 각각 0° , 45° , 90° , 135° 의 회전을 반영하여 해석하여, 각각의 회전각도 중 가장 큰 응력값을 이용하여 응력범위를 계산하였다.

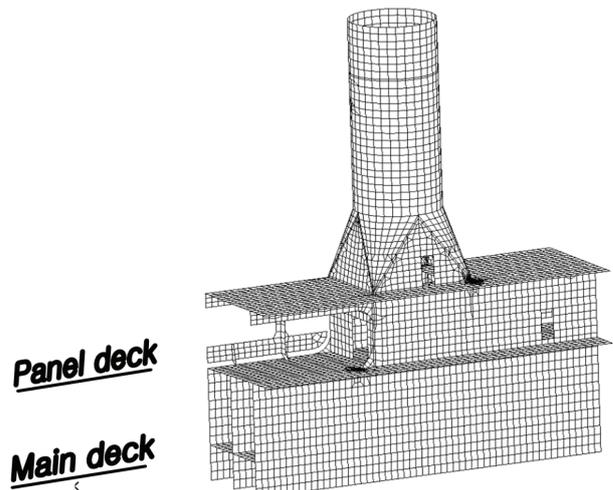


Fig. 3 FEA model for fatigue analysis

Table 3 Loading condition (LC)

LC	Applied loading	Remark
1	VWBM (Sagging)	Stress range for VWBM
2	VWBM (Hogging)	
3	Positive loading	Stress range for crane operation
4	Negative loading	
5	SWBM (Sagging)	Mean stress calculation for LC 1,2
6	SWBM (Hogging)	

Table 4 Crane operation

Safety Working Load	105 ton
Working radius	28.3 m
Dynamic Factor (y)	1.3
Trim angle	2°
Heeling angle	3°

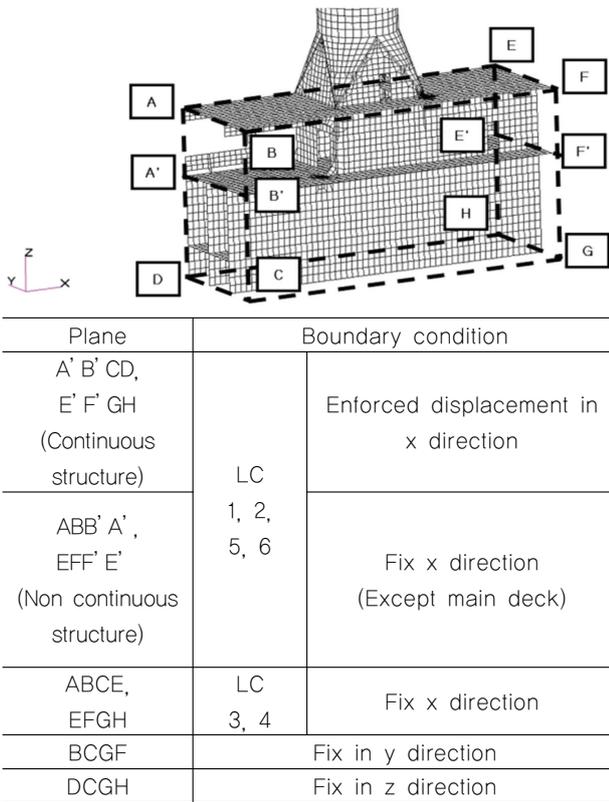


Fig. 4 Boundary conditions

3.3 피로강도 평가

본 드릴십의 설계요구조조건인 25년의 파랑하중 및 250,000회의 크레인 운용조건을 토대로 누적손상도를 구하였다.

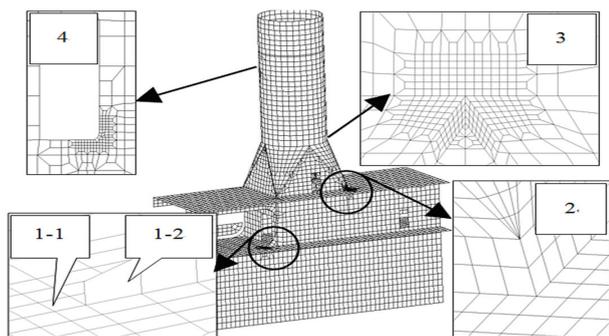


Fig. 5 Hotspot area for fatigue analysis

Table 5 Damage ratio

Posi.	$\Delta\sigma_{model}$ (N/mm ²)		D_{VWBM}	D_{crane}	D
	VWBM	Crane			
1-1	164	16	0.7	0	0.7
1-2	117	13	0.2	0	0.2
2	12	278	0	0.5	0.5
3	0	142	0	0.1	0.1
4	0	261	0	0.1	0.1

Fig. 5는 드릴십에 설치된 165ton 크레인 페데스탈의 피로해석 부위를 보여준다.

165ton크레인 페데스탈의 각 피로해석 부위별 응력범위($\Delta\sigma_{model}$) 및 누적손상도는 Table 5와 같다. 해석결과, 상갑판 상부에 위치한 1-1 및 1-2는 수직파랑 굽힘모멘트에 의한 누적손상도가 지배적이며, 해석위치 2, 3, 4와 같은 크레인 페데스탈 부위는 크레인 동하중에 의한 누적손상도가 지배적이나, 그 크기가 크지 않다. 이는 크레인 사용횟수가 파랑하중의 횟수보다 작기 때문이다. 또한, 1-1 및 1-2위치에서 D_{CRANE} 이 0에 가까운 값이 나온 이유는 상갑판 상부에 설치된 불연속 갑판(panel deck)이 크레인 운용하중을 흡수한 원인으로 사료된다. 또한, 3번 부위의 응력범위가 4번 부위의 응력범위보다 작음에도 불구하고 누적손상도가 같은, 3번 부위는 용접부이고 4번 부위는 모재이기 때문이다.

4. 결론

드릴십에 설치된 크레인 페데스탈 및 주위 구조에 대하여 수직 파랑 굽힘모멘트 및 크레인 운용 시 발생하는 동하중을 고려한 피로강도 평가를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 상갑판과 크레인 페데스탈 연결부는, 수직파랑 굽힘모멘트에 의한 누적손상도가 지배적이다.
- 상갑판에서 크레인 동하중에 의한 누적손상도가 작은 것은, 상갑판 상부에 설치된 불연속 갑판(Panell deck)이 크레인 운용하중을 흡수하기 때문으로 판단된다.
- 크레인 동하중에 의한 누적손상도는 해석위치 2, 3과 4에서 지배적이나, 하중 반복 횟수가 수직파랑 굽힘모멘트에 비하여 작으므로, 그 크기는 작다.

참고 문헌

Det Norske Veritas, 2002. *Structural Design of Offshore Ships*, Det Norske Veritas, 2010. *Fatigue Assessment of Ship Structures*, Federation Europeenne de la Manutention, 1998. *Rules for the Design of Hoisting Appliances*, Gusto Projects B.V., 2008. *Hull Crane Foundation Calculation Report*, Kim, S.M, et al., 2008. A Comparative Study for the Fatigue Assessment of Side Shell Longitudinals on 8,100 TEU Container Carrier using Hot Spot Stress and Structural Stress Approaches, *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 45(3), pp.296-302.

